



## PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO NA USINAGEM DE UM MATERIAL SANDUÍCHE

Michele Lisboa Silveira <sup>(1)</sup>, Bruna Aparecida Rezende <sup>(2)</sup>, Paulo Eustáquio Faria <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> e <sup>(2)</sup> - Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). <sup>(3)</sup> Professor orientador - UFMG

### RESUMO

O *Design of Experiments* (DOE – planejamento de experimentos) é uma ferramenta de vasta aplicabilidade na engenharia, que permite gerar, estruturar e otimizar dados em operações de usinagem. Dentre as diversas operações de usinagem, a furação, que consiste em um movimento de corte circular utilizado para união secundária de estruturas. Em decorrência da competitividade entre as empresas, é de suma importância que os produtos atendam requisitos mínimos de qualidade, e a abordagem estatística apresentada pelo DOE tem sido aplicada na indústria, a fim de otimizar as respostas em processos de fabricação. Inicialmente o estudo identifica como a velocidade de corte, o avanço e o tipo de broca influenciaram sobre os quesitos de acabamento do furo, rebarba e circularidade, durante a operação de furação. Em seguida, aplicou-se uma ferramenta de otimização para encontrar os melhores níveis de cada um destes parâmetros, a fim de garantir melhor desempenho simultâneo das variáveis resposta. Constatou-se que o tipo de broca utilizada e a interação broca e avanço tiveram influência sobre a altura da rebarba, e que a broca *Brad & Spur* resultou em peças com menores rebarbas. Com relação à circularidade, os fatores broca e avanço, bem como as interações entre broca e velocidade de corte e entre broca e avanço apresentaram influência sobre a circularidade e a menor circularidade foi obtida para a broca helicoidal com duas arestas. A otimização indicou que as melhores respostas para acabamento do furo foram a *Brad & Spur* com velocidade de corte de 72 m/min e avanço de 0,15 mm/rev.

**Palavras-chave:** DOE, furação, rebarba, circularidade, *Response Optimizer*.

### 1 INTRODUÇÃO

Diversos materiais são conhecidos e utilizados na indústria, com destaque para metais, polímeros e cerâmicas. Entretanto, a combinação destes materiais tem sido importante para a criação de produtos com características específicas. Entre os vários materiais utilizados para a concepção de produtos finais, os painéis sanduíche desempenham uma função importante devido a algumas propriedades, como baixo peso, rigidez e resistência elevada.

Askeland *et al.* (2011) consideram que materiais sanduíche são constituídos por finas camadas de um material revestido unido a um material de enchimento de baixo peso, tal como uma espuma polimérica. Uma característica importante é que os materiais isolados não são



fortes e rígidos, mas, quando combinados na estrutura sanduíche, conseguem adquirir esta propriedade.

Embora as peças em materiais sanduíche sejam produzidas na forma quase final, a usinagem torna-se fundamental devido à necessidade em cumprir tolerâncias de montagem, podendo ser preciso realizar furos para possibilitar a ligação de peças em estruturas. A operação que permite a ligação por parafusos, rebites ou cavilhas é a furação (DURÃO *et al.*, 2013).

A broca helicoidal é a ferramenta mais utilizada para a produção de furos (Stemmer, 2001), podendo ser encontrada no mercado com diferentes formas geométricas. Brocas helicoidais com diferentes geometrias são usadas para a furação de materiais estruturais, como a helicoidal, escalonada e *Brad & Spur*.

Em um cenário de competitividade, a indústria de manufatura busca produzir peças com qualidade e excelência operacional. Buscam maior qualidade no produto manufaturado, necessitando de controles rigorosos dos parâmetros de corte bem como dos seus efeitos sobre o acabamento do produto final. Dois efeitos da operação de furação podem ser analisados como resposta da qualidade do produto usinado, são eles as rebarbas e o desvio de circularidade.

As rebarbas são defeitos que consistem em projeção de material além do furo e podem ser encontradas na entrada e também na saída do furo. As rebarbas são decorrentes de deformação plástica do material usinado. A maioria dos problemas relacionados com a rebarba na furação é causada pela rebarba de saída, porque ela é maior que a de entrada (KIM *et al.*, 2001).

O erro de circularidade também é medido para avaliar a qualidade do furo. A circularidade é a zona de tolerância delimitada por dois círculos concêntricos em que o perfil real apresentado pelo furo deve se situar. Calcula-se o erro de circularidade pela diferença dos diâmetros  $D$  e  $d$  dos círculos concêntricos (ASME Y14, 1994), representado pela figura 1.

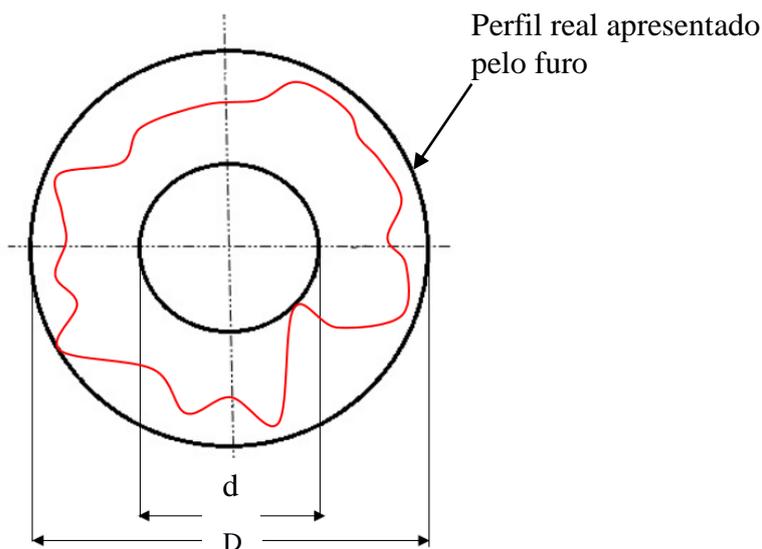


Figura 1 - Erro de circularidade

A operação de furação gera superfícies cujo acabamento deve garantir qualidade, e isto implica em materiais com as menores rebarbas e desvios de circularidade possíveis. Projetar experimentos, coletar dados e analisá-los permite agregar conhecimento acadêmico e industrial. Muitas vezes, são desconhecidos os parâmetros de corte que otimizam a qualidade de um produto final. Dessa forma, decidir entre diferentes parâmetros de manufatura e entender a influência de variáveis sobre os quesitos de qualidade, torna-se importante para entender o processo e determinar as melhores condições de usinagem.

### 1.1 DOE e otimização

A Metodologia de Planejamento e Análise de Experimentos, ou simplesmente Projeto de Experimentos (DOE), é uma ferramenta que permite a melhoria da qualidade e produtividade, auxiliando na tomada de decisões em diversas áreas do conhecimento.

Técnicas de planejamento de experimentos são utilizadas a fim de verificar o funcionamento de sistemas ou processos produtivos, permitindo a melhoria destes, como a redução na variabilidade e conformidade próximas do resultado desejado, além de diminuição no tempo de processo e, conseqüentemente, nos custos operacionais. A utilização de planejamentos experimentais que estejam embasados em fundamentos estatísticos proporciona aos pesquisadores a obtenção de um número máximo de informações do sistema em estudo, a partir de um número mínimo de experimentos (BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2007).

De acordo com Montgomery, (2009), um experimento planejado é um teste – ou uma série de testes – onde mudanças propositais são feitas em variáveis de entrada de um processo de modo a se observar mudanças correspondentes nas variáveis de saída. Montgomery (2009) considera ainda que experimentos fatoriais são utilizados quando se deseja tratar dois ou mais fatores simultaneamente para o conhecimento de níveis ótimos de operação de cada fator. Já quando existem vários fatores de interesse em um experimento, um planejamento fatorial se faz necessário. Neste caso, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores estudados devem ser promovidas no experimento. O efeito de um fator é definido como a mudança em seu nível.

A análise DOE é uma abordagem de otimização que permite combinar todas as possíveis interações entre os fatores de entrada, bem como a influência dos fatores sobre a variável resposta, de modo que o tempo necessário para gerar dados passíveis de interpretação é menor quando comparado a outros métodos estatísticos. Este é o diferencial perante outras análises, que raramente revelam condições ideais para um processo e não consideram fatores de ruído, além da necessidade de um número significativamente maior de experimentos (WEISSMAN e ANDERSON e 2015).

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Corpo de prova e condições experimentais

O material usinado consiste em um painel sanduíche de duas chapas (superior e inferior) de ligas de alumínio (EN AW-ALMg1-5005), com um núcleo de polietileno (PE) de baixa densidade ( $0,92 \text{ g/cm}^3$ ), conforme figura 2. Sobre o corpo de prova foram realizados furos, variando-se diversos parâmetros, conforme a tabela 1.

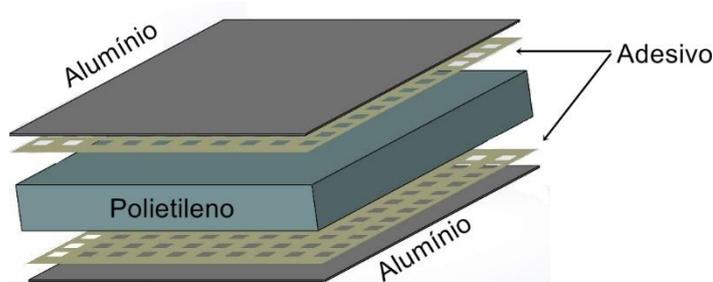


Figura 2 - PEALL



Tabela 1 - Parâmetros do experimento.

Símbolo	Fatores	Níveis			
		1	2	3	4
A	Ferramenta	<i>Brad &amp; Spur</i>	helicoidal com 02 (duas) arestas	helicoidal com 03 (três) arestas	-
B	Velocidade de corte (m/min)	24	48	72	-
C	Avanço (mm/rev)	0,05	0,10	0,15	0,25

## 2.2 Ferramentas de corte

Utilizaram-se três brocas de metal duro, cuja descrição é apresentada na tabela 3. Suas diferentes características geométricas são mostradas na figura 3.

Tabela 3 - Descrição técnica das brocas utilizadas nos ensaios de furação.

Broca	Descrição
<i>Brad &amp; Spur</i>	Broca de metal duro, marca GUHRING, classe K10, diâmetro de 5 mm, comprimento de 57 mm, haste cilíndrica, oxidada a vapor e duas arestas de corte.
Helicoidal com duas arestas	Broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5 mm, comprimento de 62 mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta de 118°, helicoidal com duas arestas de corte.
Helicoidal com três arestas	Broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5mm, comprimento de 62 mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta 150°, helicoidal com três arestas de corte.

Figura 3 - Brocas utilizadas para furação: a) Brad & Spur b) helicoidal com duas arestas c) helicoidal com três arestas.



### 2.3 Sistema de aquisição de dados

Os testes de furação foram realizados no centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560, equipado com comando numérico computadorizado SIEMENS 810D, com potência máxima de 9kW e rotação máxima de 7500 rpm.

Para a medição da altura das rebarbas na saída do furo, foi utilizado o microscópio Askania, modelo GSZ 2T, com micrômetro acoplado (resolução de 0,01 mm). Para cada furo, posicionou-se a linha do microscópio no início e no fim da rebarba (considerando-se a maior altura), para que pudesse ser feita a subtração e encontrar o valor desejado. A figura 4 representa esquematicamente a medição da altura da rebarba.

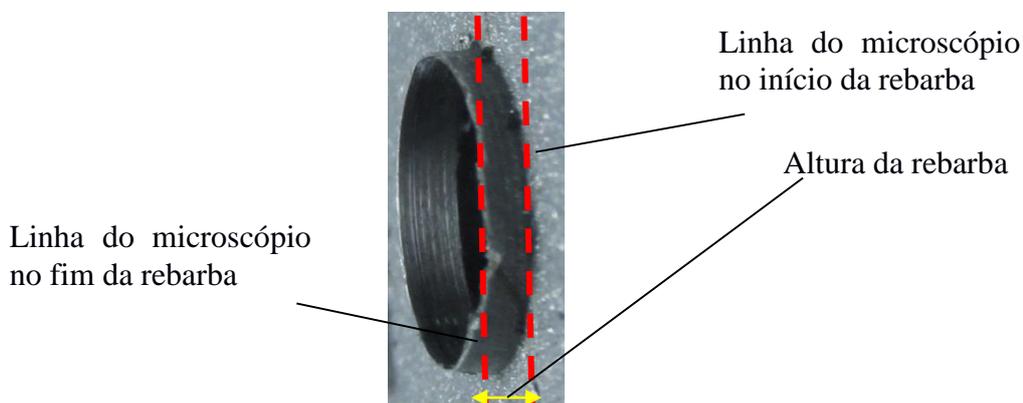


Figura 4 - Representação esquemática da medição da altura da rebarba

Para medir a circularidade dos furos, utilizou-se a máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D, equipada com *software* REFLEX SCAN (versão 1.2) com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$ . Foram medidos 8 pontos para cada furo, a fim de se obter maior precisão. O erro de circularidade foi medido no ponto médio da espessura do furo, ou seja, a 2 mm da superfície do material.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Altura da Rebarba

De acordo com a figura 5, tem-se que os resíduos dos dados altura da rebarba não seguem uma distribuição normal ( $p$ -valor  $< 0,005$ ). Na figura,  $N$  representa o número de testes e  $AD$  é a estatística do teste de Anderson-Darling para testar a normalidade dos dados (SUPORTE MINITAB, 2018). É uma medida dos desvios entre a linha ajustada (com base na distribuição selecionada) e a função da etapa não paramétrica (com base nos pontos de dados).

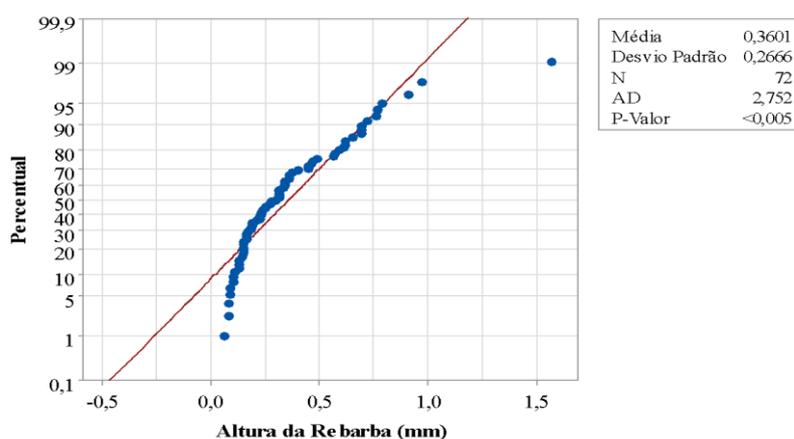


Figura 5 – Resíduos para a altura da rebarba

Após a realização da transformada  $\lambda$  ótima, obteve-se um novo  $p$ -valor (0,359), configurando, portanto, dados estatisticamente normais, conforme apresentado na figura 6.

Na figura 6 observa-se que a variação dos resíduos ao redor da linha de referência não seguiu nenhuma tendência específica, o que comprova que a variância foi constante (Resíduos versus Ajustes). Também é possível detectar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo (Resíduos versus Ordem). Logo, com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

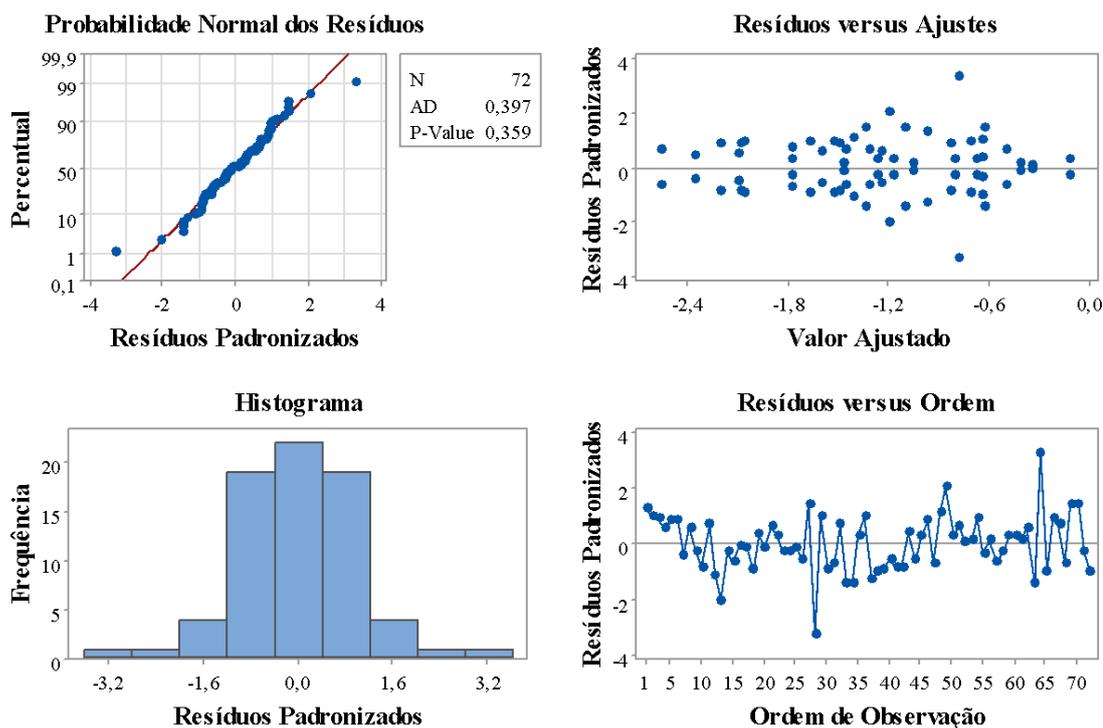


Figura 6- Resíduos para a Altura da Rebarba após a realização da transformada  $\lambda$  ótima

A figura 7 representa o diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta altura da rebarba gerada pelo software Minitab 18. Por meio deste gráfico, é possível identificar quais termos mais contribuem para a variabilidade na resposta. Ele exhibe os termos, de cima para baixo, em ordem decrescente de importância. Uma linha pontilhada de referência, fixada neste estudo ao nível de significância  $\alpha=0,05$ , determina quais termos são significativos. Qualquer barra que se estenda além dessa linha representa um efeito significativo. Portanto, nota-se que o fator broca e a interação entre broca e avanço são considerados significativos na altura da rebarba.

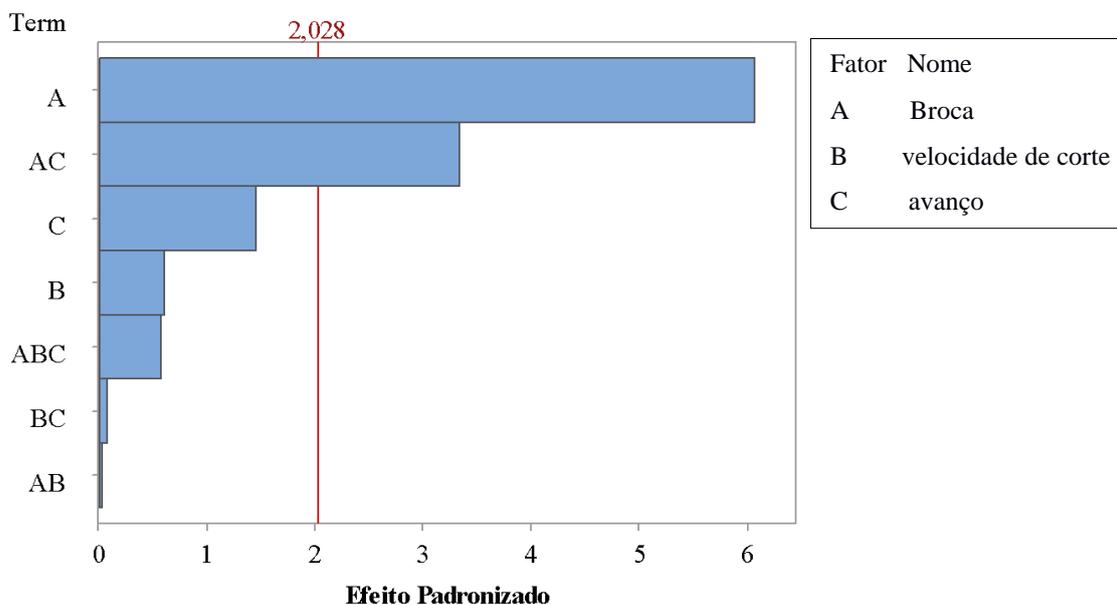
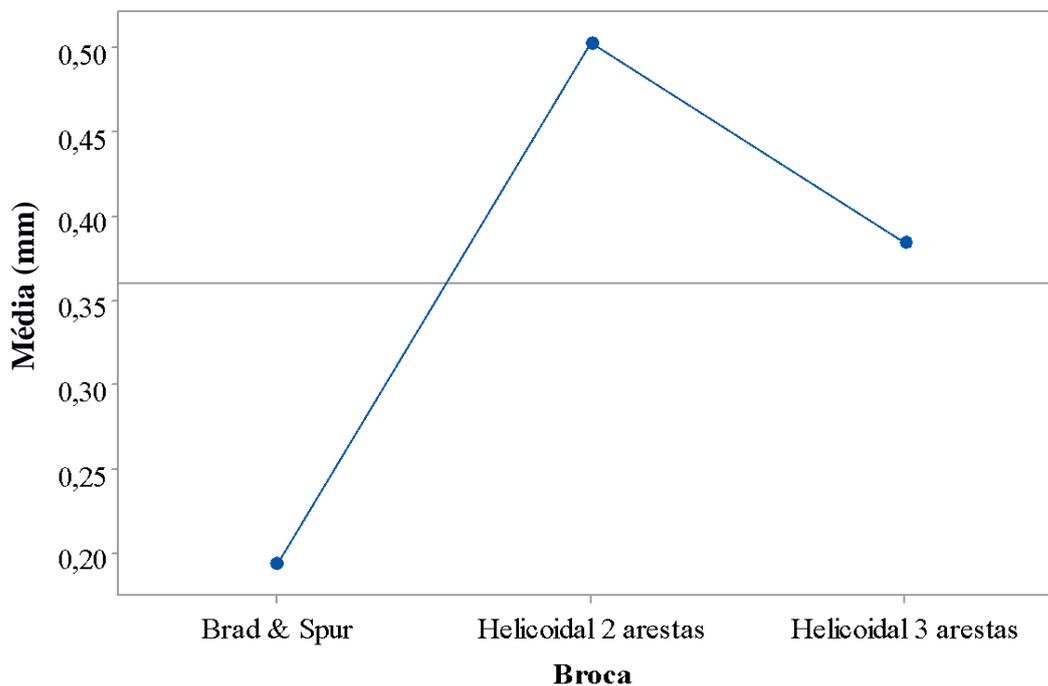


Figura 7- Diagrama de Pareto para a Altura da Rebarba

Pode-se observar na figura 8 que as menores alturas de rebarba foram obtidas para a furação com a broca Brad & Spur. De acordo com a classificação de Kim *et al.* (2001), as rebarbas geradas pela broca Brad & Spur podem ser classificadas como rebarbas uniformes, com um acabamento padrão em toda a superfície do furo. O melhor acabamento dos furos realizados com a Brad & Spur pode ser explicado devido à geometria da broca. Neste caso, a Brad & Spur permitiu que o material sob a aresta de corte se deformasse do centro para as arestas da broca, já que o ponto central de corte da broca empurrou o material inicialmente, para depois cortar. Além disso, sua geometria permitiu a limpeza das rebarbas rapidamente, o que facilitou o corte e reduziu os esforços, já que a broca trabalhou apenas para cortar a peça de trabalho, sem que as aparas impactassem na operação.

Também foi constatado que as rebarbas geradas pela broca helicoidal com três arestas foram menores que as geradas pela helicoidal com duas arestas. Resultados semelhantes foram obtidos por Faria (2007), Ema *et al.* (1991) e Agapiou (1993). Pode-se dizer, portanto, que o aumento no número de arestas de corte diminuiu a altura da rebarba. Isto ocorre porque, quando se tem mais arestas de corte, o avanço gerado por cada aresta de corte é menor, permitindo o corte efetivo de material, sem empurrá-lo, formando uma rebarba com altura menor.



Figura

Figura 8- Gráfico de Efeito Principal para a Altura da Rebarba

De acordo com figura 9, pode-se observar que com o aumento do avanço, nem sempre há aumento da altura da rebarba. Houve variações de acordo com o tipo de broca. A menor rebarba foi obtida para o avanço de 0,15 mm/rev.

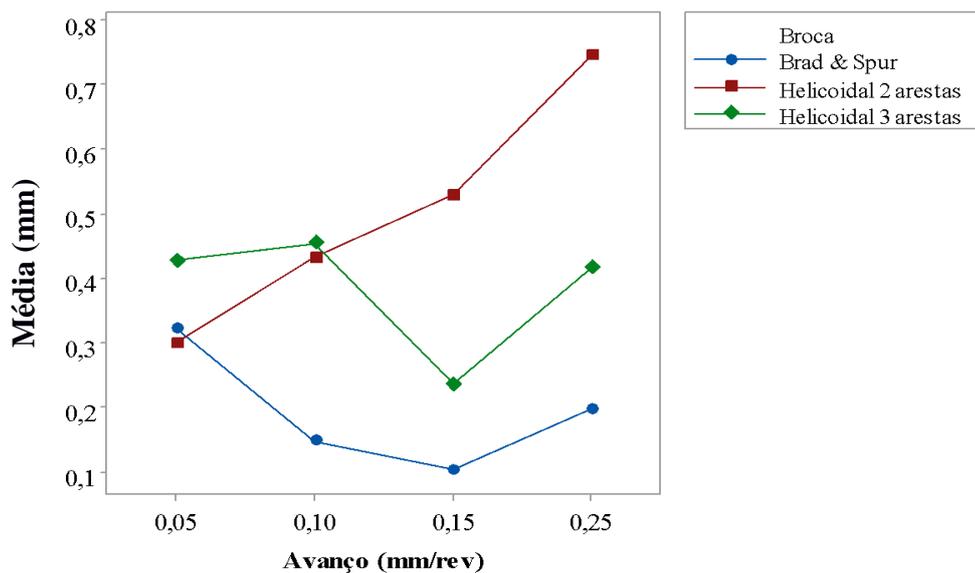


Figura 9- Gráfico de interação broca versus avanço

### 3.2 Circularidade

De acordo com a figura 10, tem-se que os resíduos dos dados de circularidade não seguem uma distribuição normal ( $p$ -valor  $< 0,005$ ). Após a realização da transformada  $\lambda$  ótima, obteve-se um novo  $p$ -valor (0,190), configurando, portanto, dados estatisticamente normais, conforme figura 11.

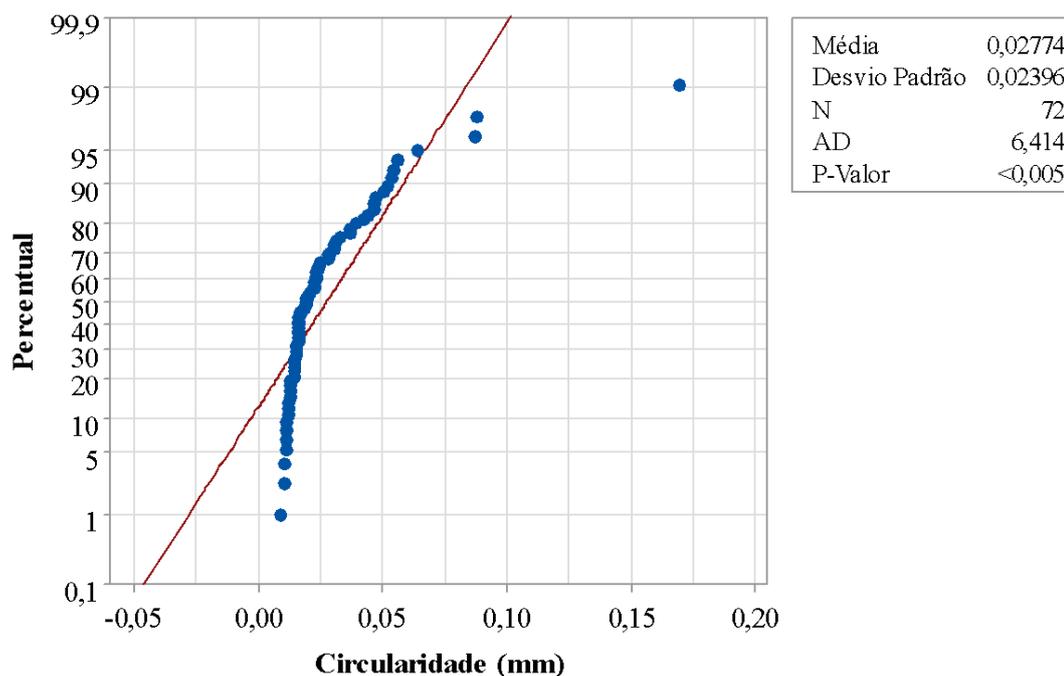


Figura 10 - Resíduos para a circularidade

De acordo com a figura 11, observa-se que a variação dos resíduos ao redor da linha de referência não seguiu nenhuma tendência específica, o que comprova que a variância foi constante (Resíduos versus Ajustes). Também é possível detectar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em relação ao tempo (Resíduos versus Ordem). Logo, com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

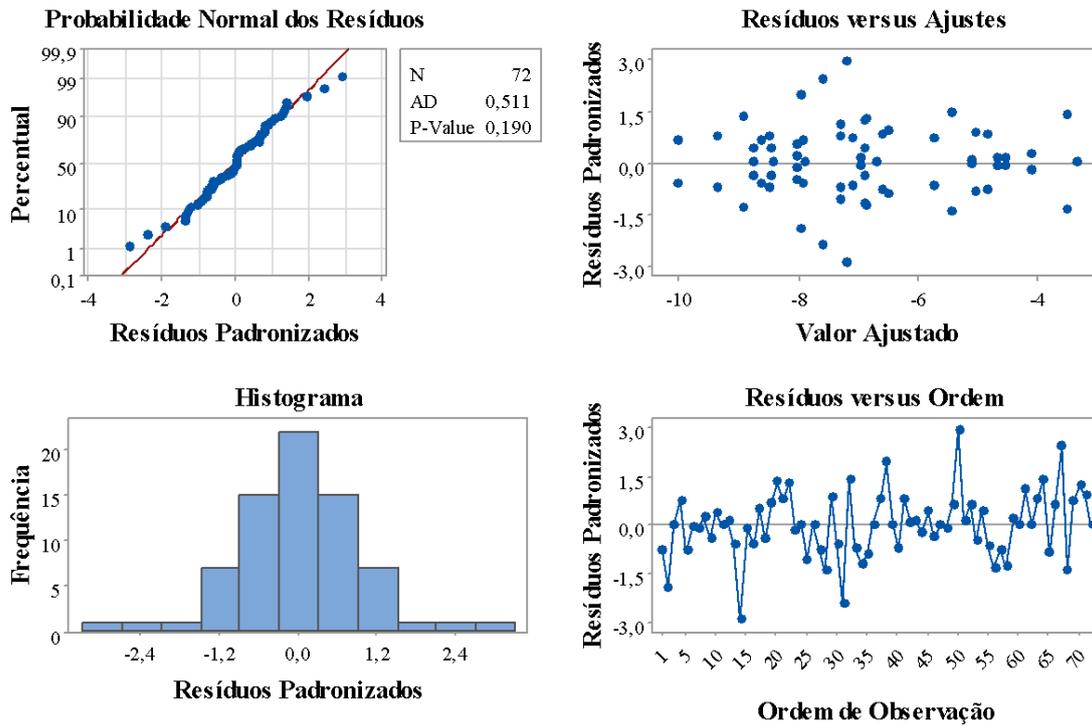


Figura 11 - Resíduos para a circularidade após a realização da transformada  $\lambda$  ótima

A figura 12 representa o diagrama de Pareto dos efeitos para a variável resposta circularidade gerada pelo software Minitab 18. Nota-se que os fatores broca e avanço e as interações entre broca\*velocidade de corte e broca\*avanço apresentaram influência sobre a circularidade.

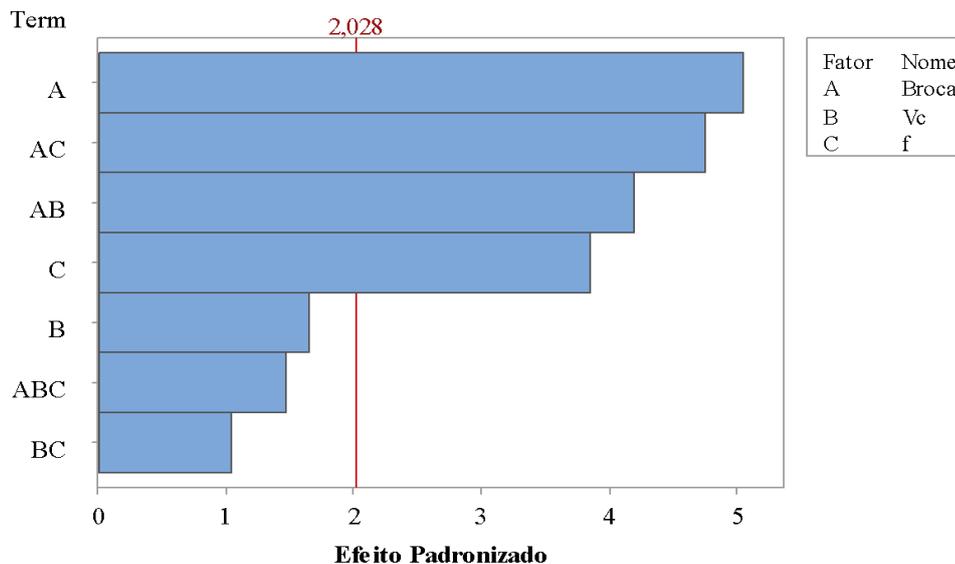


Figura 12- Diagrama de Pareto para a Circularidade

Na figura 13 pode-se observar que com relação à geometria da ferramenta, a broca helicoidal com duas arestas obteve menor variabilidade dos dados, enquanto a broca helicoidal com três arestas apresentou o erro de circularidade máximo. A broca helicoidal com duas arestas possuía um ângulo de ponta menor, de  $118^\circ$ , e a helicoidal com três arestas, um ângulo de ponta de  $150^\circ$ , o que justifica a diferença na variável resposta. Os maiores esforços de corte também estão associados aos maiores níveis de vibração, contribuindo para o aumento do desvio do furo, e dentre as brocas helicoidais, os menores esforços foram obtidos para a broca helicoidal 2 arestas. As menores circularidades foram obtidas para os avanços 0,10 e 0,15 mm/rev.

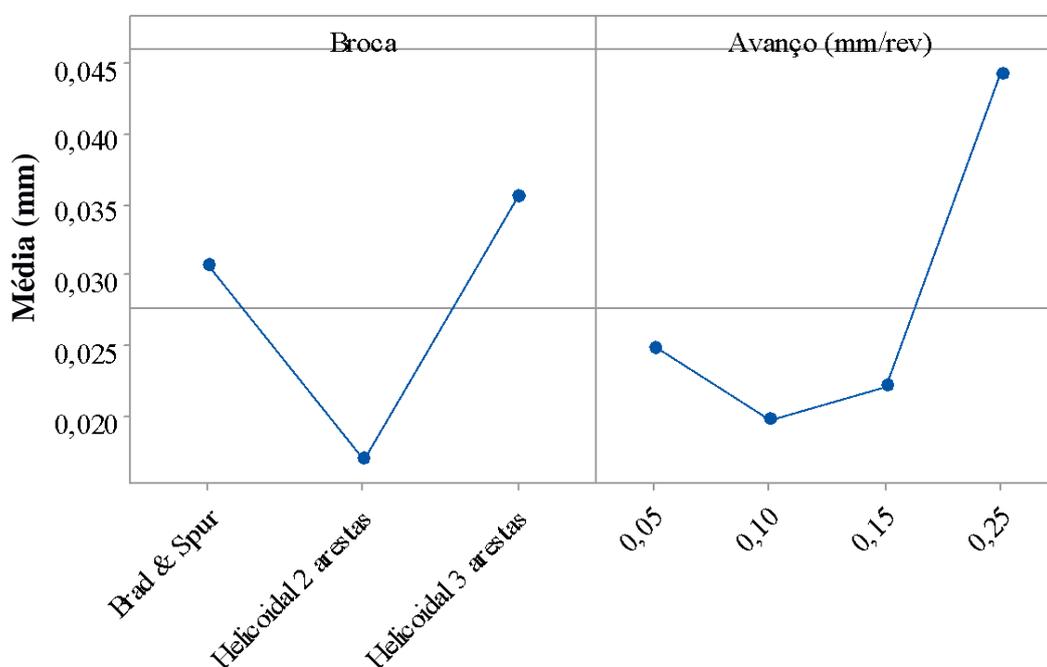


Figura 13- Gráfico de Efeitos Principais para a Circularidade

Com relação à influência do avanço, nas brocas Brad & Spur e helicoidal com três arestas, o aumento do avanço aumentou a circularidade. Este comportamento está associado à maior quantidade de material retirado por volta. Na broca helicoidal com duas arestas, o aumento do avanço diminuiu a circularidade, mas não se pode atribuir algum efeito especial, pois os erros de circularidade para a broca helicoidal com duas arestas ficaram muito próximos uns dos outros (figura 14).

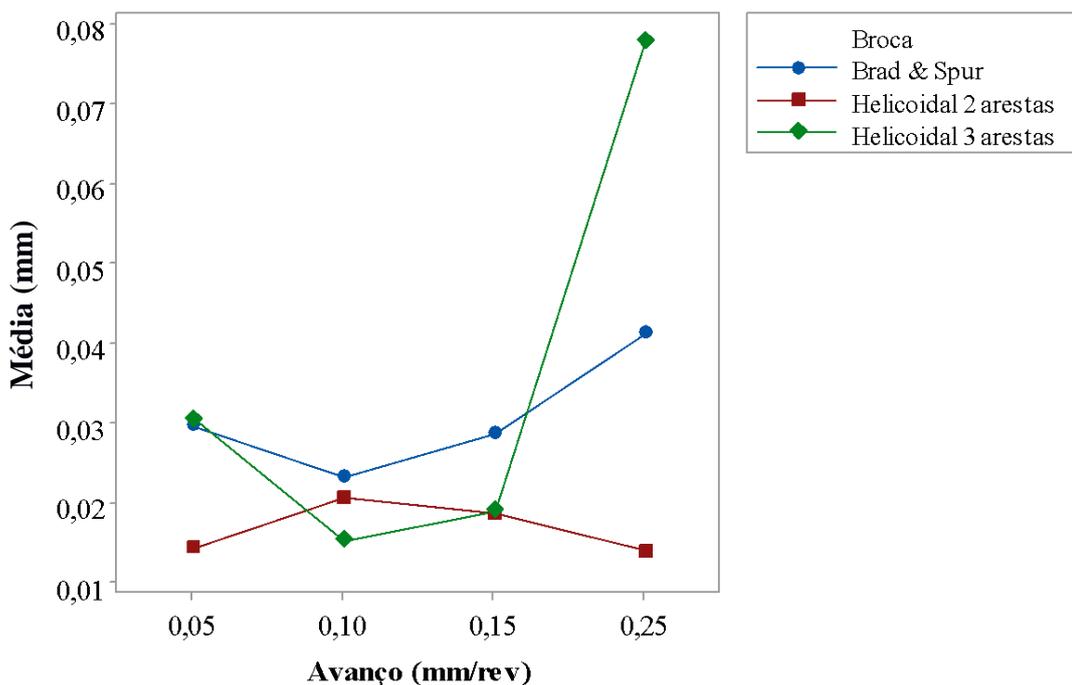


Figura 14- Gráfico de interação broca versus avanço.

A figura 15 apresenta a interação ferramenta versus velocidade de corte. Considerando então apenas as velocidades de 24 m/min e 72 m/min, é possível dizer que o erro de circularidade máximo foi observado para a velocidade de 72 m/min, com relação à velocidade de 24 m/min. Uma justificativa se dá ao fato de que maiores temperaturas são obtidas para maiores velocidades, o que leva a maiores desvios dos furos. Observou-se um comportamento instável das brocas na faixa de velocidade de 48 m/min, o que confirma a falta de influência da velocidade de corte sobre a circularidade.

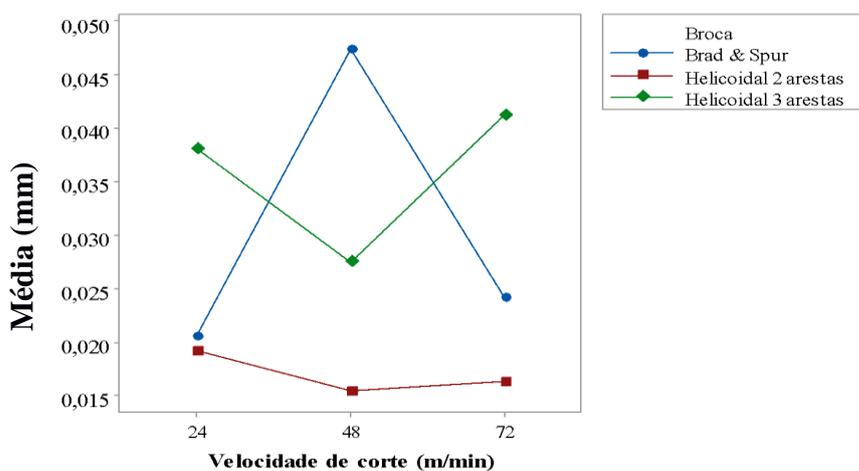


Figura 15- Gráfico de interação broca versus velocidade de corte.



### 3.3 Otimização Global da Altura da rebarba e Circularidade Simultaneamente

No caso do presente trabalho, tem-se a análise de múltiplas respostas, visto que os resultados ótimos para as variáveis mensuradas são conflitantes. Para estas situações, pode ser interessante realizar um tratamento global de forma a encontrar os níveis dos fatores capazes de otimizar as múltiplas respostas simultaneamente. Assim, foi utilizada a ferramenta “*Response Optimizer*” do Software Minitab 18. O objetivo é minimizar a altura da rebarba, bem como o erro de circularidade. À medida que a resposta se afasta do alvo, a função *desirability* decresce. Na análise de otimização do Minitab, cada resposta é transformada usando uma função *desirability* específica. Os critérios para buscar as configurações ótimas globais dos fatores são baseados na função *desirability* individuais ( $d_i$ ) e composta ( $D_i$ ). As configurações ótimas dos fatores são as que maximizam a função *desirability*. A função *Desirability* varia de 0 a 1. Um valor de 1 representa o caso ideal; 0 indica que uma ou mais respostas estão fora de seus limites aceitáveis.

A utilização desta ferramenta requer a definição do intervalo de especificação para cada variável resposta, o nível de importância relativa e os pesos de cada variável resposta. Para a variável altura da rebarba, o alvo definido foi de 0,06 mm. Já para a variável Circularidade, o alvo foi 0,009 mm, sendo os menores valores encontrados. Quanto ao nível de importância das respostas, foi considerado que as duas variáveis são igualmente importantes. Já em relação ao peso, o experimento foi configurado de tal forma que será dado igual importância ao alvo e aos limites de especificação das variáveis resposta. A figura 16 ilustra os resultados da otimização, sendo que em vermelho estão mostrados os valores otimizados de cada variável de entrada. A combinação ótima obtida foi: broca *Brad & Spur*, velocidade de corte de 72 m/min e avanço de 0,15 mm/rev. A função *Desirability* composta apresentou valor de 0,9722.

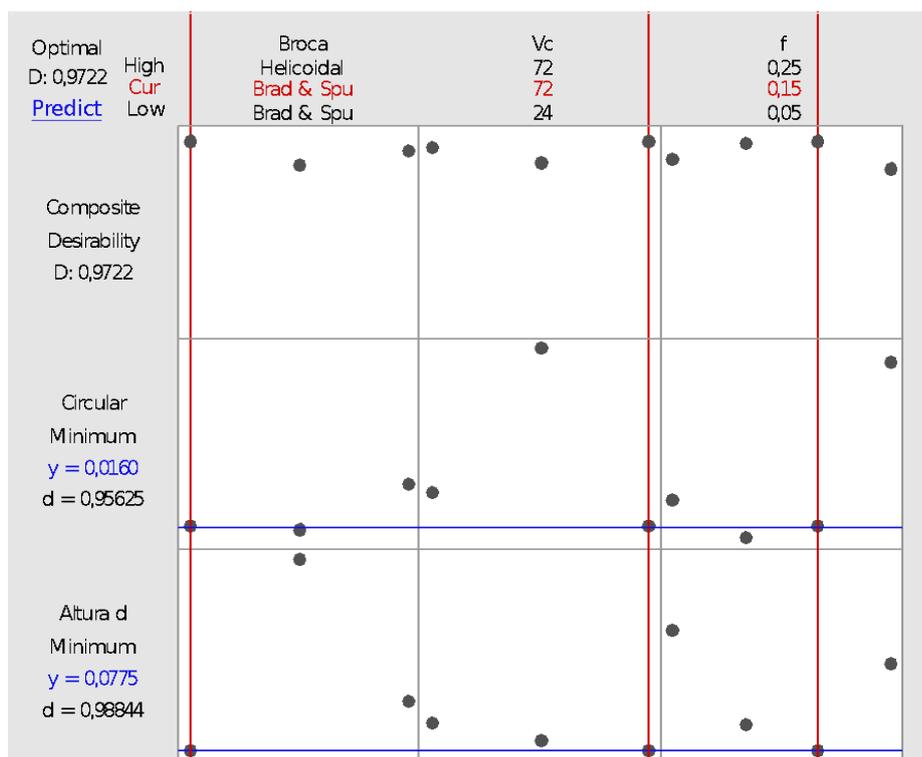


Figura 16 - Otimização Global da Altura da rebarba e circularidade.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise DOE dos experimentos de furação do material compósito sanduíche foi possível analisar a correlação entre os diversos parâmetros investigados e as variáveis respostas mensuradas. Com relação à altura da rebarba o parâmetro mais influente foi a ferramenta. Já com relação à circularidade, pôde ser concluído que os parâmetros mais influentes sobre a mesma foram os efeitos broca e avanço. Por fim, através da otimização global da altura da rebarba e circularidade simultaneamente foi atestado que os níveis ótimos foram a broca Brad & Spur, velocidade de corte de 72 m/min e avanço de 0,15 mm/rev.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores dessa pesquisa agradecem aos departamentos de Engenharia de Produção e Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pela disponibilização do Laboratório de Usinagem e Automação. Agradecem às agências de fomento Capes, CNPQ e Fapemig e ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – *Campus Bambuí* pela oportunidade de divulgação do trabalho.



## DESIGN OF EXPERIMENTS AND OPTIMIZATION IN THE MACHINING OF A SANDWICH MATERIAL

### ABSTRACT

Design of Experiments is a tool of vast applicability in engineering, that allows to generate, to structure and to optimize data in operations of machining. Among the various machining operations, the drilling is important, which consists of a circular cutting movement used for secondary joining of structures. As a result of competitiveness among companies, it is extremely important that products meet minimum quality requirements, and the statistical approach presented by the DOE has been applied in the industry in order to optimize the responses in manufacturing processes. Initially the study identifies how the cutting speed, feed rate and drill type influenced the drilling, burr and circularity requirements of the drilling operation. Then we applied an optimization tool to find the best levels of each of these parameters in order to ensure better simultaneous performance of the response variables. It was found that the type of drill used and the interaction drill and feed rate had influence on the height of the burr, and that the Brad & Spur drill resulted in parts with smaller burrs. In relation to the circularity, the factors drill and feed rate, as well as the interactions between drill and cutting speed and between drill and feed rate showed influence on the circularity and the smaller circularity was obtained for the twist drill with two edges. Optimization indicated that the best answers for finishing the hole were Brad & Spur with a cutting speed of 72 m / min and a feed rate of 0.15 mm / rev.

**Keywords:** DOE, Drilling, Burr, Circularity, Response Optimizer.

### REFERÊNCIAS

ASKELAND, D.R., FULAY, P.P., WRIGHT, W.J. **The Science and Engineering of Materials**. Sixth Edition. Stamford: Cengage Learning, 2011. 921 p.

AGAPIOU, J.S. **Design characteristics of new types of drill and evaluation of their performance drilling cast iron. Drills with four major cutting edges**. International Journal Of Machine Tools And Manufacture, v. 33, n. 3, p.321-341, 1993.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Dimensioning and Tolerancing**. ASME Y14.5M, 1994.

BARROS NETO, B. ; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 3. ed. Campinas: UNICAMP, 2007. 480 p.



DURÃO, L.M., GONÇALVES, D., TAVARES, J.M., ALBUQUERQUE, V.H., BAPTISTA, A.M. Danos na furação de placas carbono/epóxido. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. v. 17, n. 1, p. 27-38, 2013.

EMA, S., FUJI, H., MARUI, E. **Cutting performance of drills with three cutting edges: effects of chisel edge shapes on the cutting performance**. Int J Mach Tools Manuf., v. 31, n. 3, p.361-369, 1991.

FARIA, P.E. **Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi Reforçado com Fibras de Vidro**. Fevereiro, 2007. 231 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia da UFMG.

KIM, J., MIN, S., DORNFELD, D.A. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.41, n.7, p.923-936, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC: 2009. 532 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 5<sup>a</sup> Edição, Florianópolis: Editora UFSC, 2001, 249 p.

SUPORTE MINITAB. **Tipos de análise de regressão**. Disponível em: support.minitab.com. Acesso em dezembro de de 2018.

WEISSMAN, Steven A.; ANDERSON, Neal G. Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. **Organic Process Research & Development**, [s.l.], v. 19, n. 11, p.1605-1633, 29 ago. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/op500169m>.